

ADAPTACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN A LAS NORMAS DE *FLICKER*

Pedro E. Issouribehere y Gustavo A. Barbera
Instituto de Investigaciones Tecnológicas Para Redes y Equipos Eléctricos.
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA – ARGENTINA

Resumen: Se describe la normativa Argentina y se muestran resultados estadísticos del grado de contaminación actual encontrado en las redes de Buenos Aires.

Se comparan las impedancias normalizadas IEC utilizadas en pruebas de emisión con las reales de las redes de distribución.

Se estudia la distribución del *flicker* en un alimentador genérico y se determina analíticamente la influencia del *flicker* en el diseño de redes, por comparación con el dimensionamiento clásico por caídas de tensión. Finalmente, se ejemplifica con un caso práctico.

1. INTRODUCCIÓN

El interés por la Calidad del Servicio Eléctrico se ha incrementado los últimos años debido a la modalidad adoptada en la reestructuración de los Servicios Eléctricos de numerosos países, en especial los de Latinoamérica. Los segmentos regulados, como la Distribución, se han otorgado en concesión basándose en tarifas fijas para los usuarios finales y estándares de la Calidad a cumplir en la prestación del Servicio.

Actualmente existe la preocupación, al menos en países como La Argentina, de vincular sobre bases más técnicas, la Calidad del Servicio pretendida con las correspondientes tarifas a fijar a los servicios.

Este artículo resume un aporte en ese sentido, en una de las perturbaciones de mayor importancia, el *flicker*.

2. NORMAS DE CALIDAD DE SERVICIO

2.1 Encuadre del *flicker* entre las Normas de Calidad de Servicio.

Con la denominación de Producto Técnico, según lo establecido en los Contratos de Concesión de La Argentina, se alude al **Nivel** de la tensión suministrada, ponderado en lapsos de tiempo típicos del seguimiento de la demanda en el sistema, y a las **Perturbaciones** de la forma de la onda – distorsión, frecuencia, variaciones rápidas del nivel y otras.

El *flicker* es una de las Perturbaciones de mayor interés, y en especial en el enfoque de este artículo, dado que la magnitud del fenómeno está vinculado estrechamente al desarrollo de las redes.

2.2 Descripción de las Normas Argentinas.

Se basan en las normas IEC [1], adecuadamente adaptadas a los requerimientos de servicio público.

La Distribuidora debe cumplir con niveles de *flicker* en la tensión en todos los puntos de suministro. Las reglas, procedimientos de control y el régimen de sanciones se fijan en los Contratos. [2] [3]

La Distribuidora puede exigir a los usuarios el cumplimiento de los límites de emisión establecidos, los que guardan relación con las normas mencionadas, asignando cuotas de emisión según las demandas y áreas de la red. [4]

3. GRADO ACTUAL DE CONTAMINACIÓN POR *FLICKER* DE LAS REDES EN LA ARGENTINA.

El control de fenómeno, realizado desde 1997, da una amplia experiencia sobre la importancia real del *flicker* en las redes de distribución del país.

En la Figura 1 se presenta el histograma y la curva de distribución acumulada resultantes del procesamiento de más de 11.000 mediciones semanales – y realizadas al azar - de *flicker*.

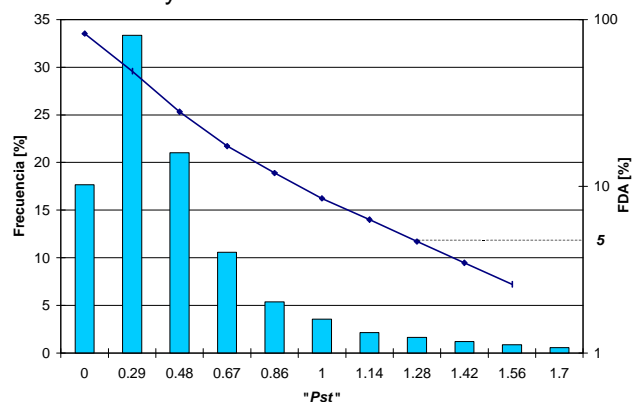


Figura 1 - Estadística de mediciones de *flicker*.

Desde la curva acumulada se puede obtener un índice del número de mediciones penalizadas. El valor máximo permitido para el P_{ST} es 1, por lo que en este caso más del 5% de las mediciones resultarían con penalización. Mayor información sobre el tema ha sido publicada con anterioridad. [5]

4. DISCUSIÓN SOBRE LAS IMPEDANCIAS NORMALIZADAS IEC Y LAS REALES EN LAS REDES.

Partiendo de la ley de distribución radial en redes secundarias se obtienen las impedancias de red vistas por las cargas. Para redes diseñadas por caídas de tensión se concluirá que los límites de la norma IEC 60725 [6] son sumamente conservadores.

4.1 Impedancia Normalizada.

El objeto es analizar la aplicación de la impedancia normalizada IEC (para prueba de equipos de consumo 16 A) a las redes comunes de BT.

La impedancia de la red de referencia es la que se muestra en la Figura 2. [6]

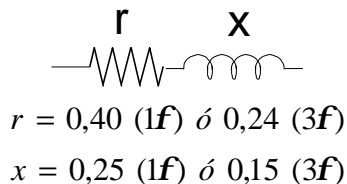


Figura 2 - Impedancia de referencia.

Con lo que las potencias de cortocircuito son:

$$S_{cc} \text{ (1f)} \cong 100 \text{ kVA}$$

$$S_{cc} \text{ (3f)} \cong 500 \text{ kVA}$$

4.2 Qué relación tiene esta red normalizada con las reales?

Para BT las cargas se distribuyen sobre un alimentador. La caída de tensión a lo largo del distribuidor debe cumplir con un máximo vinculado a la Calidad de Tensión deseada.

Un distribuidor uniforme se diseña según:

$$|\Delta U_n| = (R \cos \mathbf{j} + X \sin \mathbf{j}) \frac{I_{\text{Demanda}}}{2} \leq \Delta U_{L-L}$$

Donde: R, X : Resist, React. total del distribuidor.

$$\Delta U_{L-L}: \text{Rango admisible de la tensión por CPT.}$$

$$I_{\text{Demanda}} = F_D \sum_{k=1}^n I_k : \text{Demanda total del dist.}$$

$$F_D: \text{Factor de diversidad.}$$

Bajo la condición anterior, en el extremo del alimentador, es:

$$\frac{S_{cc_n}}{S_{L_n}} \geq \frac{1}{\frac{\Delta U_{L-L}}{U_{nom}}} \frac{F_D \cdot n}{2}$$

Expresión que da la relación entre las potencias de cortocircuito de la red y la de una carga en el extremo del distribuidor (caso peor), en función de la caída de tensión admisible, el factor de diversidad de las cargas y el número de éstas.

Por ejemplo:

$$\frac{\Delta U_{L-L}}{U_{nom}} = 0,16 \quad F_D = 0,7$$

$$n = 100 \quad \frac{S_{cc_n}}{S_{L_n}} \geq 200$$

Lo que expresa que en ese punto la potencia de cortocircuito de la red es 200 veces mayor a la de carga.

Esto equivale a una condición del orden de 6 veces mayor a la prevista en las normas de pruebas de aparatos, por lo que:

En las redes comunes - dimensionadas para cumplir con caídas de tensión típicas - las impedancias de red "vistas" por las cargas son mucho menores que las impedancias de prueba de emisión.

La alta impedancia de los circuitos de prueba - respecto a las típicas de las redes - puede atribuirse a:

i) El alto nivel de exigencia por ser pruebas de tipo de los equipos.

ii) Que los comités tiendan a adoptar valores conservativos (bajas exigencias en Calidad del Servicio y altas exigencias a las cargas perturbadoras).

iii) La previsión de un alto grado de perturbadores (si todas las cargas son emisoras de flicker en el límite previsto, el efecto sobre la red es tan importante que requiere su refuerzo).

5. DISTRIBUCIÓN DE FLICKER EN UN ALIMENTADOR.

En la Figura 3 se muestra cómo varía el Nivel de Tensión a lo largo de un alimentador típico. El flicker varía según el punto de inyección de acuerdo a una ley que se explicará, y basada en la distribución de la curva anterior.

Cada usuario domiciliario puede emitir a la red un valor de flicker de $P_{ST} = 1,0$ sobre la impedancia de referencia. La impedancia de referencia es la indicada previamente.

Este límite está fijado en La Argentina [4] y supone que los usuarios residenciales utilizan electrodomésticos de $I \leq 16 \text{ A}$, para los cuales la

norma IEC [6] fija ese límite. Como se supone que los aparatos serán pocos - 1 ó 2 ó 3 - y con bajas posibilidades de simultaneidad, el límite del usuario coincide con el de un aparato.

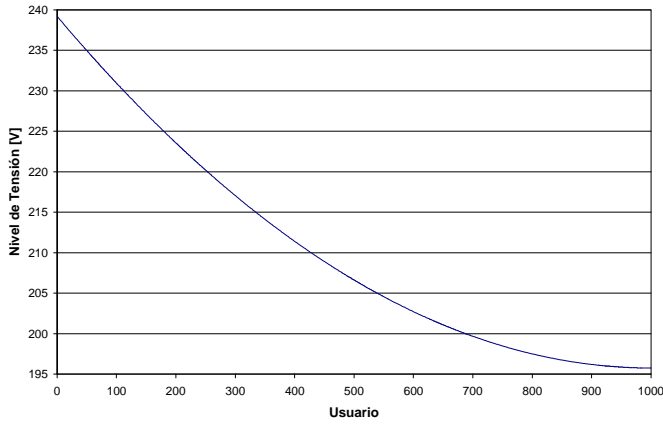


Figura 3 - Tensión a lo largo de un alimentador.

Cual será el P_{ST} en la red ?

Se supone un distribuidor de BT radial como el de la Figura 4.

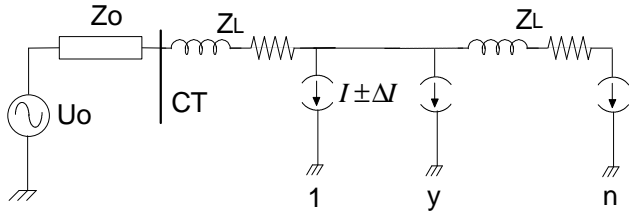


Figura 4 - Modelo de red estudiado.

Donde:

$$S_{cc(MT / BT)} = \frac{S_{MT / BT}}{x_{cc}(p.u)}$$

$S_{(MT / BT)}$ = Potencia nominal del transformador.

$$Z_o = \frac{3U_{nom}^2}{S_{MT / BT}} \cdot x_{cc}(p.u)$$

$$U_{nom} = 220 V$$

Por ejemplo: $S_{MT / BT} = 250 kVA$

$$cc = 0.04 \quad X_{MT / BT} = 0.023 \Omega$$

Cada uno de los n usuarios podrá inyectar un *flicker* en la red de:

$$P_{STy} = P_{STr} \cdot \frac{S_{ccr}}{S_{ccy}}$$

Donde:

P_{STy} : Valor del *flicker* inyectado por el usuario y en la red de potencia de c.c. S_{ccy} .

P_{STr} : Valor del *flicker* sobre la red de referencia, de potencia de c.c. S_{ccr} .

Este *flicker* se transfiere a otro nodo, p.e, las barras de BT del Centro de Transformación (CT), según:

$$P_{STCT} = P_{STr} \cdot \frac{S_{ccr}}{S_{ccy}} \cdot \frac{S_{ccy}}{S_{ccCT}} = P_{STr} \cdot \frac{S_{ccr}}{S_{ccCT}}$$

Este es el *flicker* que se transfiere desde una carga perturbadora a otro nodo aguas arriba (no aguas abajo). La expresión es independiente de la posición de la carga en el distribuidor radial.

Cuál es el efecto combinado de las n cargas sobre un mismo punto?

Lo que sigue se basa en un criterio de superposición de emisiones - ley cúbica de adición de cargas aleatorias - que tiene origen en la experiencia de perturbaciones en hornos de arco, y que ya ha sido adoptado en La Argentina.

En el CT será:

$$P_{STCT} (Total) = P_{STr} \cdot \frac{S_{ccr}}{S_{ccCT}} \cdot \sqrt[3]{n}$$

Dado que:

$$S_{ccCT} \cong \frac{S_{MT / BT}}{x_{cc}(p.u)} \quad y \quad S_{MT / BT} = F_D \cdot n \cdot S_L$$

Donde:

S_L : Potencia de demanda de c/carga.

F_D : Factor de diversidad de las demandas.

$$P_{STCT} (Total) = P_{STr} \cdot \frac{S_{ccr}}{F_D \cdot S_L} \cdot x_{cc}(p.u) \cdot n^{-2/3}$$

A mayor n , menor *flicker* en el CT. (Con n adaptado a la potencia instalada).

Para un punto genérico del distribuidor, y considerando que:

- Todos las cargas generan igual *flicker* (P_{STr}) sobre la referencia (S_{ccr}).
- Cada carga "ve" una potencia de cortocircuito: S_{ccy} .
- El *flicker* emitido por y se transfiere aguas abajo sin atenuación.

Será:

$$P_{STy} = P_{STr} \cdot S_{ccr} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{1}{S_{cc1}^3} + \dots + \frac{1}{S_{ccy}^3} + (n-y) \frac{1}{S_{ccy}^3} \right)}$$

Donde el último término bajo la raíz corresponde al aporte de todos los emisores a espaldas del punto y y, los anteriores, al aporte de cada uno de los emisores hasta el y .

Para $y = n$, en la ecuación anterior:

$$P_{STn} = P_{STCT} \cdot \sqrt[3]{1 + 3 \cdot \frac{S_{ccCT}^2 \cdot Z_1 \cdot n}{3U_{nom}^2} + 3 \cdot \frac{(S_{ccCT})^2 \cdot (Z_1 n)^2}{(3U_{nom}^2)^2} + \frac{S_{ccCT}^3 \cdot (Z_1 n)^3}{(3U_{nom}^2)^3} \cdot \frac{1}{4}}$$

La expresión anterior muestra que el *flicker* en el extremo del distribuidor es el del origen multiplicado por un factor que depende de la potencia de cortocircuito en el CT y de los productos $Z_1 \cdot n$.

Los productos $Z_1 \cdot n$ están vinculados a la caída en el alimentador, que es:

$$|\Delta U_n| \cong |Z_1| \cdot n \cdot \frac{I_{Demanda}}{2}$$

Se pretende estimar el *flicker* a prever en el extremo de un distribuidor diseñado para cumplir con los límites de calidad de tensión. Será:

$$|Z_1| \cdot n \cdot \frac{I_{Demanda}}{2} \leq \Delta U_{L-L}$$

Por lo que:

$$Z_1 \cdot n \leq \frac{\Delta U_{L-L}}{U_{nom}} \cdot \frac{2 \cdot 3 \cdot U_{nom}^2}{S_{MT/CT}}$$

Con lo cual:

$$P_{ST_n} = (1 + 1,26b) \cdot P_{ST_{CT}}$$

Donde: $b = \frac{\Delta U_{L-L}}{U_{nom}} \cdot \frac{1}{x_{cc}(p.u.)}$

Esta expresión da el *flicker* en el extremo del distribuidor radial respecto al producido por las cargas perturbadoras del distribuidor en el CT.

La expresión tiene validez según las siguientes condiciones:

- Las cargas (n) se distribuyen uniformemente en el distribuidor y son iguales (o se distribuye el valor medio). *Nota:* Una expresión similar se puede hallar para otras distribuciones.
- El distribuidor se ha diseñado para cumplir con una cierta caída de tensión máxima.
- Todas las cargas, a la vez, emiten un mismo *flicker* P_{ST} , sobre la impedancia normalizada.
- La combinación de emisiones es cúbica.

6. INFLUENCIA DE LOS LÍMITES DE COMPATIBILIDAD FIJADOS EN EL DIMENSIONAMIENTO DE LA RED.

Se demostrará que el requerimiento de las normas de calidad de *flicker* influye en el diseño clásico de redes de BT.

Cálculo Analítico

Sea un distribuidor de BT con:

$$n=100 \quad S_L=3,6 \text{ kVA (3 } \phi) \quad F_D=0,7$$

El transformador será:

$$S_{MT/CT} = F_D \cdot n \cdot S_L = 250 \text{ kVA}$$

$$x_{cc}(p.u.) = 0,04$$

La potencia de cortocircuito en la barra de BT del CT será (supuesta $S_{cc_{MT}} = \infty$):

$$S_{cc_{CT}} = 6,25 \text{ MVA}$$

Si cada usuario (supuestos todos ellos en categoría T_1 : *Pequeñas Demandas*) cumple con la norma de emisión, será:

$$P_{ST_r} \leq 1,0 \quad \text{sobre } S_{cc_r} = 500 \text{ kVA}$$

El *flicker* al nivel del CT será:

$$P_{ST} \leq P_{ST_r} \cdot \frac{S_{cc_r}}{S_{cc_{CT}}} \sqrt[3]{n} = 1,0 \cdot \frac{0,5}{6,25} \sqrt[3]{100} = 0,37$$

Este valor es mucho menor que el penalizable en la red ($P_{ST} = 1,0$).

Si el distribuidor se dimensiona por CPT, entonces el *flicker* en el extremo del distribuidor será como muestra la Tabla 1.

$\frac{\Delta U_{L-L}}{U_{nom}} (\%)$	b	P_{ST} (extremo)
10	2,5	1,54
16	4	2,23
20	5	2,71

Tabla 1 – *Flicker* en el extremo del distribuidor.

El valor supera el límite no penalizable.

En este caso la red deberá sobredimensionarse para cumplir con los requerimientos de flicker.

El *flicker* en el extremo no debe superar el límite.

$$P_{ST_n} = P_{ST_r} \cdot \frac{S_{cc_r}}{S_{cc_{CT}}} \sqrt[3]{n} \cdot (1 + 1,26b) \leq 1,0$$

Para ello - tomando el caso de CPT para red subterránea - es:

$$i) \quad b = cte. \Rightarrow S_{cc_{CT}}(2) = S_{cc_{CT}}(1) \cdot 1,54$$

Debe aumentarse la potencia de c.c. en el CT, es decir:

$$S_{MT/CT}(2) = 1,54 S_{MT/CT}(1) = 385 \text{ kVA.}$$

Debe instalarse un trafo de 400 kVA, en vez del de 250 kVA, que es el estrictamente necesario por carga.

ii) No cambiar el trafo y reforzar la red de BT.

$$1 + 1,26b(2) = \frac{1}{1,54} [1 + 1,26b(1)]$$

$$b(2) = 1,35$$

Lo que implica que el distribuidor deberá diseñarse para $\frac{\Delta U}{V} \leq 5,4 \%$.

Esto requiere aproximadamente duplicar la red de BT (doble cable de igual sección o pasar de cable preensamblado de 50 a 95 mm², etc).

iii) Disminuir n (y, en consecuencia, descargar los distribuidores de BT).

Ejemplo de Aplicación

En un Centro de Transformación (CT) se efectuó una medición de *flicker* normalizada IEC.

Este CT resultó penalizado, con niveles de P_{ST} por encima de los de referencia en más del 60 % de la semana de medición. El CT contaba con un Transformador de 315 kVA.

En la Figura 5 se muestra el perfil de la medición, donde aparece el P_{ST} medido, el de referencia (igual a 1) y la corriente registrada.

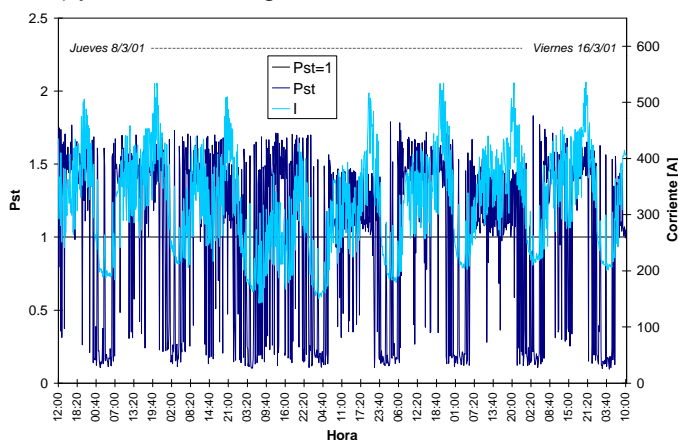


Figura 5 - Medición con transformador de 315 kVA.

Con el propósito de mitigar el problema, la Empresa decidió aumentar la potencia instalada en el CT, sin actuar sobre la carga perturbadora.

En lugar del transformador de 315 kVA, se instaló uno de 800 kVA. Se llevó a cabo una nueva medición en el CT en aproximadamente dos semanas.

El perfil obtenido en esta oportunidad es el que aparece en la Figura 6.

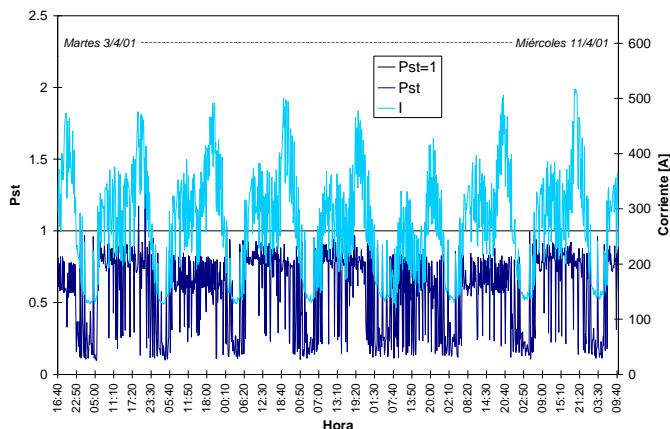


Figura 6 - Medición con transformador de 800 kVA.

De esta gráfica se observa que, si bien la carga prácticamente no ha variado, el nivel de *flicker* disminuyó notoriamente. Esta nueva medición no resultó penalizada.

Con este ejemplo se pone de manifiesto cómo suele sobredimensionarse la red para cumplir con las exigencias de Calidad de Producto Técnico (en este caso *flicker*).

7. CONCLUSIONES

En las redes de distribución de La Argentina se dispone de una importante experiencia en la medición normalizada de *flicker*.

El grado de contaminación no es alarmante, sin embargo, se ha explicado aquí cómo en aquellos casos en los que se exceden los límites tolerables, su mitigación requiere un sobredimensionamiento importante de las redes. Por ello, la compatibilización entre la emisión y los límites impuestos al fenómeno en la red influye en las tarifas de los servicios regulados.

Las impedancias de la red normalizada IEC, sobre las cuales se prueban los perturbadores, son sustancialmente conservativas respecto a las que se encuentran en las redes diseñadas para cumplir con normas de Calidad en la tensión.

8. REFERENCIAS

- [1] Normas IEC 61000-x-yy, correspondientes a *flicker*.
- [2] Contratos de Concesión de los Servicios Públicos de Electricidad de La Argentina.
- [3] Anexo a la Resolución ENRE 184/00. *Base Metodológica para el Control de la Calidad del Producto Técnico. Etapa 2.*
- [4] Anexo a la Resolución ENRE 99/97. *Base Metodológica para el Control de la Emisión de Perturbaciones. Etapa 2.*
- [5] ISSOURIBEHRE P., BARBERA G., MARTÍNEZ J., GALINSKI A. "Experiencias en el control de armónicas y *flicker* en servicios eléctricos públicos". *Proc. I Conferencia Internacional del Área Andina del IEEE*. pp. 541-546. Porlamar, Venezuela. 8-10 Sept. 1999.
- [6] IEC 60725. *Considerations on reference impedances for use in determining the disturbance characteristics of household appliances and similar electrical equipment, 61000-3-3. Limitation of voltage fluctuations and flicker in low-voltage supply systems for equipment with rated current $\leq 16A$, etc)*

Autor Principal:

Nombre: Pedro E. Issouribehere

e-mail: pedroi@iitree.ing.unlp.edu.ar

fax: 54 221-425-0804 int 322

teléfono: 54 221-423 6695/6697

Direcciones: Calle 48 y 116 La Plata Argentina